

# Comparación de dos técnicas de demultiplexación de sensores: la Transformada Rápida de Fourier y el método de Clasificación de Múltiples Señales

## Comparison of two demultiplexing techniques: the Fast Fourier Transform versus the Multiple Signal Classification method

Silvia DIAZ <sup>(1)</sup>, Manuel LOPEZ-AMO <sup>(1)</sup>, César JÁUREGUI <sup>(2)</sup>, José Miguel LÓPEZ-HIGUERA <sup>(3)</sup>

1. Departamento de IEE, Universidad Pública de Navarra, Campus de Arrosadia s/n, 31006, Pamplona.
2. Institute of Applied Physics, Friedrich-Schiller, University Jena, Max-Wien-Platz 1 07743, Jena, Alemania.
3. Departamento TEISA, Universidad de Cantabria, Avenida de los Castros s/n, 39005, Santander.

Persona de contacto: Silvia DIAZ ([silvia.diaz@unavarra.es](mailto:silvia.diaz@unavarra.es)).

### RESUMEN:

En este trabajo se compara el funcionamiento de dos técnicas de demultiplexación de sensores basados en redes de difracción Bragg e interrogados interferométricamente: la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y el método de Clasificación de Múltiples Señales (MUSIC). Los experimentos demuestran que el método MUSIC se comporta mejor que la FFT.

**Palabras clave:** Multiplexación, transformadas de Fourier, procesamiento de señal, sensores de fibra óptica.

### ABSTRACT:

We present a performance comparison between two techniques for demultiplexing of interferometrically interrogated Fibre Bragg Grating sensors: the Fast Fourier Transform (FFT) and the Multiple Signal Classification method (MUSIC). Experiments prove that the latter behaves better than the first one.

**Key words:** Multiplexing, Fourier transforms, signal processing, fiber optics sensors.

## 1.- Introducción

Las redes de difracción en fibra óptica (Fiber Bragg gratings, FBGs) constituyen hoy en día uno de los sensores de fibra óptica mas utilizados. Son dispositivos selectivos en longitud de onda cuya función de transferencia varía al modificar su temperatura o cuando sufren una elongación. Para su multiplexación, basta con colocar en cascada diferentes sensores que reflejen distintas longitudes de onda, de manera que puedan identificarse individualmente mediante un barrido en longitudes de onda. Para el procesamiento de la información proveniente de los sensores existen varios métodos de demultiplexación en longitud de onda [1-

5]. De esta forma, se puede medir simultáneamente la respuesta de todos los sensores utilizando un analizador de espectros óptico, o se pueden interrogar secuencialmente los sensores individuales mediante un filtro óptico sintonizable situado antes del subsistema de detección.

Se han propuesto y demostrado diferentes técnicas para la medida de la longitud de onda reflejada por sensores basados en FBGs. Una de estas técnicas consigue demultiplexar arrays de sensores basados en FBGs mediante el paso de la luz reflejada por el array a través de un interferómetro Michelson. Mediante el procesamiento del interferograma resultante, se puede determinar las

longitudes de onda de pico. Davis y Kersey [6] demostraron resoluciones en longitud de onda de 15 pm. Flavin [7] por su parte consiguió una resolución de 5 pm aplicando la transformada de Hilbert.

En este trabajo comparamos dos técnicas para la medida de longitudes de onda situadas muy próximas en el espectro: el método clásico de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y una técnica novedosa de interrogación basada en la estimación paramétrica de frecuencia llamada MUSIC [8,9].

Las dos técnicas pueden utilizarse para medir un número elevado de longitudes de onda reflejadas por FBGs e iluminadas por una fuente de banda ancha o para interrogar sensores interferométricos [9].

En ambos métodos es posible interrogar FBGs multiplexadas empleando un software de procesado encargado de separar las señales procedentes de cada FBG. La longitud de onda central de cada FBG se mide comparando la periodicidad del interferograma con un interferograma de referencia de alta coherencia. La técnica de interrogación empleada calcula la señal analítica de ambos interferogramas, asignando un valor de fase a cada punto muestreado.

En este trabajo se demuestra experimentalmente que la precisión y resolución proporcionadas por el algoritmo MUSIC [10] superan a las obtenidas mediante la FFT cuando se emplea para la demultiplexación de FBGs. También se discuten las ventajas e inconvenientes de ambas técnicas.

## 2.- Teoría

En general, los métodos para estimar el contenido espectral de una señal pueden dividirse en: a) paramétricos o de alta resolución y b) no paramétricos o basados en el periodograma. Los primeros métodos (paramétricos) son aquellos que utilizan parámetros conocidos de la señal, como el número de tonos que contiene. Este método es capaz de resolver picos espectrales separados por una distancia frecuencial menor que  $1/T$  (siendo  $T$  el tiempo de observación de la señal), que es el límite de resolución para los métodos basados en el periodograma. A esta clase pertenece el método MUSIC.

Por otra parte, la ventaja principal de los métodos clásicos (no paramétricos) basados en el periodograma (como los que emplean algoritmos basados en la FFT), es que tienen un coste computacional muy bajo y se pueden implementar eficientemente. Sin embargo, en general, los métodos basados

en el periodograma o la FFT no pueden resolver frecuencias muy cercanas.

Aquí se propone el uso de un novedoso método paramétrico para examinar el contenido espectral de una señal de medida. Este algoritmo paramétrico se denomina MUSIC, y asume un número de tonos conocido en la señal de medida. El nombre MUSIC es el acrónimo de Multiple Signal Classification y fué desarrollado por Schmidt [11]. Este método estima el pseudoespectro de una señal o matriz de correlación utilizando el método de análisis del autoespacio de Schmidt. Este algoritmo realiza un análisis del autoespacio de la matriz de correlación de la señal para estimar el contenido frecuencial de la señal. Es adecuado especialmente para señales que pueden considerarse una suma de sinusoidales más ruido blanco Gaussiano.

La estimación del pseudoespectro mediante MUSIC viene dada por la siguiente expresión:

$$p_{music}(f) = \frac{1}{e^H(f) \left( \sum_{k=p+1}^N \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^H \right) e(f)} = \frac{1}{\sum_{k=p+1}^N |\mathbf{v}_k^H e(f)|} \quad (1)$$

Donde  $N$  es la dimensión de los autovectores del interferograma y  $\mathbf{v}_k$  es el autovector  $k$  de la matriz de correlación. El número entero  $p$  es la dimensión del subespacio de señal, por lo que los autovectores  $\mathbf{v}_k$  utilizados en la suma corresponden a los autovalores más pequeños y por tanto, pertenecen al subespacio de ruido. El vector  $e(f)$  consiste en exponenciales complejas que forman el autovector de una senoide de frecuencia  $f$ . Teniendo en cuenta que todos los autovectores de una matriz son ortogonales, si se realiza un barrido frecuencial, siempre que la frecuencia coincida con una de las sinusoides de la señal, el producto  $\mathbf{v}_k^H e(f)$  será cero, y el pseudoespectro presentará un polo.

Sin embargo, cuando se trabaja con luz no monocromática, como la procedente de un array de sensores basados en redes de difracción, el procesado se complica. La dificultad surge al analizar los interferogramas correspondientes a las longitudes de onda Bragg individuales, pues éstas se solapan en el detector produciendo una imagen más compleja. Así es necesario discriminar, dentro de este interferograma complejo, las diferentes longitudes de onda Bragg.

Al igual que en las referencias [3,6,12,13], el sistema propuesto aquí utiliza el interferograma de un láser de referencia. En nuestro sistema de procesado de señal se adquieren simultáneamente  $N$  muestras de los interferogramas de señal y de

referencia a una razón de muestreo fija y se corrige la no uniformidad por software.

Si se representan las intensidades de un sensor FBG y del láser de referencia a la salida del interferómetro como funciones del retardo  $\tau$  entre las ramas del interferómetro, se obtiene:

$$I_j(\tau) = A_j(\tau) \cos(\phi_j(\tau)) = A_j(\tau) \cos(\omega_j \tau + \varepsilon_j) \quad (2)$$

donde los subíndices  $j = L, B$  se refieren al láser de referencia y a la reflexión de la red de difracción, respectivamente,  $\omega_j$  y  $\varepsilon_j$  son los términos de frecuencia y fase iniciales y  $A_j(\tau)$  son funciones de  $\tau$  que varían lentamente. La longitud de onda del láser de referencia es 1560 nm.

Las funciones de fase vienen dadas por:

$$\phi_L(\tau) = \omega_L \tau + \varepsilon_L \quad (3)$$

$$\phi_B(\tau) = \left( \frac{\omega_B}{\omega_L} \right) \{ \phi_L(\tau) - \varepsilon_L \} + \varepsilon_B \quad (4)$$

De la ecuación (4), el cociente  $\omega_B/\omega_L$  es igual a la pendiente de la gráfica de  $\phi_B(\tau)$  frente a  $\phi_L(\tau)$ , que se define como  $\eta_{BL} = \Delta\phi_B/\Delta\phi_L = \omega_B/\omega_L$ . Estas gráficas de las funciones de fase se obtienen experimentalmente con el software de procesamiento MatLab utilizando el algoritmo correspondiente a MUSIC, denominado pmusic o el de la FFT. Se puede obtener la relación entre la longitud de onda central del FBG y la longitud de onda de referencia:  $\lambda_B/\lambda_L = \omega_L/\omega_B$ , de ahí  $\lambda_B = \lambda_L/\eta_{BL}$ . Por tanto, para obtener la pendiente entre  $\phi_B(\tau)$  y  $\phi_L(\tau)$ , es necesario recuperar las funciones de fase  $\phi_B(\tau)$  y  $\phi_L(\tau)$ , y finalmente obtener la longitud de onda de reflexión (Bragg). Para ello se requiere un proceso de estimación de frecuencia de un intervalo corto de cada interferograma, ya que es necesario discriminar en este interferograma complejo las diferentes longitudes de onda Bragg que se solapan en el detector.

### 3.- Sistema experimental y resultados

La Fig. 1 muestra el sistema de interrogación propuesto. Las redes de difracción se iluminan mediante un láser superluminiscente SLD (modelo SLD-761-DIL-SM-PD de Fiberon Inc.) utilizando un acoplador 2x2. La señal reflejada se lleva a un interferómetro Fabry-Pérot utilizando un circulator de tres puertos. La cavidad se crea colocando la punta de una fibra frente a un espejo fijado a un motor de barrido. En este caso se ha elegido un interferómetro Fabry-Pérot, en vez de un Mach-Zehnder o un Michelson porque es más fácil de implementar, más estable y permite mayores rangos de barrido. El interferograma de

salida se muestrea periódicamente en el fotodetector.

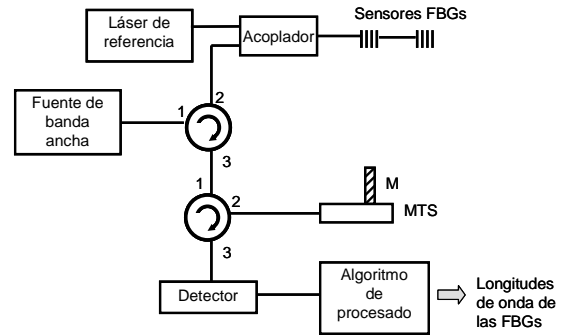


Fig. 1: Diagrama de bloques del sistema propuesto para la interrogación de redes de difracción Bragg. M, espejo; MTS, etapa motorizada de barrido.

El primer experimento comprueba el funcionamiento de esta técnica para medir la elongación (strain) utilizando un FBG con una longitud de onda de reflexión de 1531 nm. La luz reflejada del FBG y del láser se detecta en un PC. El FBG se somete a elongaciones de 0 a 1200  $\mu$ strain. La Fig. 2 muestra los resultados experimentales de la variación de la longitud de onda Bragg con la elongación.

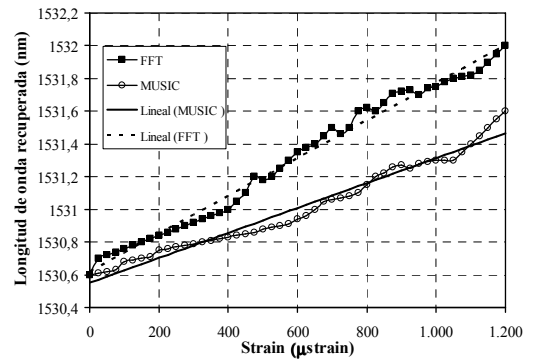


Fig. 2: Resultados de la variación de la longitud de onda Bragg con la elongación utilizando los métodos de la FFT y MUSIC. Se muestra la linealidad obtenida con ambas técnicas.

Para comparar los algoritmos basados en la FFT y MUSIC, se han aplicado ambos al procesamiento del mismo experimento. Los resultados demuestran que MUSIC es más preciso que la FFT. Así, a partir de la Fig. 2, la exactitud media fue de 1 nm

con la FFT, mientras que con MUSIC se obtiene 0.6 nm. Es decir, en el peor caso, la longitud de onda Bragg difiere 1 nm respecto a su valor real, en el caso de la FFT, y la diferencia es de 0.6 nm si se utiliza MUSIC. Sin embargo, en ambos casos el error de exactitud en la medida de la longitud de onda del FBG rondó el 1%. Sin embargo en una unidad de interrogación lo más importante es la determinación precisa, esto es repetitiva, de la variación de longitud de onda, más que el valor concreto de la misma.

El segundo experimento realizado analizó la resolución del sistema. Según la Fig. 2 se obtuvo una resolución de 100 pm utilizando el método de la FFT, mientras que con MUSIC la resolución fue de aproximadamente 40 pm, correspondiente a la mínima variación en longitud de onda.

Además, MUSIC proporciona mejor linealidad y exactitud en la longitud de onda recuperada.

Los resultados obtenidos experimentalmente concuerdan con los hallados teóricamente en [10], donde el error en la resolución dado por la FFT es de 2 nm, mientras que con MUSIC fue de 1 nm. Además, la resolución del sistema utilizando la FFT y MUSIC fue de 200 pm y 100 pm, respectivamente.

También se analiza la estabilidad del sistema. La Fig. 3 muestra los resultados obtenidos. Durante el experimento, el FBG de 1531 nm se sometió a tensión durante 45 min. en tres intervalos de 15 min., desde 60  $\mu$ strain a 500  $\mu$ strain y finalmente a 1000  $\mu$ strain.

Las medidas periódicas del mismo FBG durante 45 min. proporcionaron un error en la determinación de la longitud de onda de 0.52 nm utilizando MUSIC y 2 nm en el caso de la FFT. Las máximas fluctuaciones en longitud de onda fueron de 3 nm con la FFT y menores de 1 nm con MUSIC. Aunque la estabilidad temporal de las gráficas mostradas en la Fig. 3 no es muy buena, se ha conseguido una técnica interferométrica de bajo coste. En cualquier caso la estabilidad temporal afecta tanto a los resultados obtenidos con la FFT como con MUSIC, lo cual demuestra que se trata de un problema inherente a nuestro sistema demostrador. Específicamente la estabilidad temporal se puede mejorar simplemente empleando un interferómetro de barrido (MTS) que sea mecánicamente más robusto que el actual.

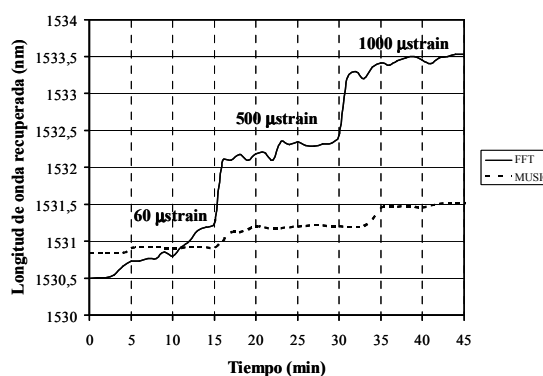


Fig. 3: Resultados de la estabilidad obtenida en tres zonas aplicando 60  $\mu$ strain, 500  $\mu$ strain y 1000  $\mu$ strain utilizando los métodos de la FFT y MUSIC.

Finalmente, se comprobó la capacidad de recuperar las longitudes de onda de dos FBGs multiplexadas (con longitudes de onda Bragg de 1524 nm y 1534 nm, respectivamente). La demultiplexación se consigue haciendo un filtrado paso banda del espectro en frecuencia del interferograma recuperado, dado que éste es muy complejo y es necesario tomar un intervalo corto del mismo.

Primero se determinó la banda central de frecuencia del filtro paso banda y después se realizó el filtrado. A continuación, se aplicaron y compararon los métodos de la FFT y MUSIC. Las longitudes de onda se calcularon utilizando un interferograma de  $2^{16}$  puntos. Utilizando la FFT las longitudes de onda obtenidas de los FBGs fueron de 1524.9 nm y 1533.74 nm, mientras que con MUSIC son de 1524.15 nm y 1534.13 nm. Por tanto, el error de estimación de la longitud de onda Bragg se considera inferior a 0.15 nm, mientras que con la FFT es  $\leq 0.9$  nm. La Tabla 1 resume los resultados obtenidos con ambos métodos.

	FFT	MUSIC
Error	1 nm	0.6 nm
Exactitud	$\cong 1\%$ de $\lambda_{\text{FBG}}$	$\cong 1\%$ de $\lambda_{\text{FBG}}$
Resolución	100 pm	40 pm

Tabla 1: Resumen de los resultados obtenidos con los métodos de la FFT y MUSIC.

#### 4.- Conclusión

En este trabajo se han comparado dos métodos de estimación frecuencial para demultiplexación de sensores FBG en fibra óptica. Uno de ellos, el método MUSIC, se ha aplicado por vez primera a sistemas con sensores FBG. Con él es posible detectar las longitudes de onda Bragg con más precisión que con el método clásico basado en la FFT. Las prestaciones obtenidas con ambas técnicas se han validado teórica y experimentalmente. Se ha conseguido una resolución en longitud de onda de 40 pm utilizando MUSIC, siendo ésta más del doble que la obtenida con la FFT. Se ha medido la estabilidad obtenida con MUSIC y la FFT, obteniendo errores en la determinación de la longitud de onda de 0.52 nm y 2 nm, respectivamente. Además, la exactitud y resolución obtenidas con MUSIC son mejores que con la FFT. En general, MUSIC se comporta mejor que la FFT y permite multiplexar un gran número de FBGs utilizando una sola fuente de banda ancha y un solo interferómetro en recepción.

*Agradecimientos:* Este trabajo se ha financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación mediante el proyecto TEC2007-67987-C02.

#### Referencias

- [1] José Miguel López-Higuera, "Handbook of Optical Fiber Sensing Technology" (John Wiley, 2002).
- [2] A. D. KERSEY, M.A. DAVIS, H.J. PATRICK, J.M. LEBLANC, K.P. KOO, C.G. ASKINS, M.A. PUTMAN y E.J. FRIEBELE, "Fibre grating sensors", J. Lightwave Technol., vol. 15, nº 8, 1442-1463, 1997.
- [3] D.A. FLAVIN, R. MCBRIDE y J.D.C. JONES, "Short-scan interferometric interrogation and multiplexing of fibre Bragg grating sensors", Optics Communications, vol. 170, 347-353, 1999.
- [4] Y. Zhao y Y. Liao, "Discrimination methods and demodulation techniques for fiber Bragg grating sensors", Optics and Lasers in Engineering, vol. 41, 1-18, 2004.
- [5] L. Xiaohong, W. Dexiang, Z. Fujun y D. Enguang, "Simultaneous independent temperature and strain measurement using one Fiber Bragg Grating based on the etching technique", Microwave Opt. Technol. Lett., vol. 43, nº 6, 478-481, 2004.
- [6] M.A. DAVIS y A.D. KERSEY, "Application of a fiber Fourier transform spectrometer to the detection of wavelength-encoded signals from Bragg grating sensors", J. Lightwave Technol., vol. 13, nº 7, 1289-1295, 1995.
- [7] D.A. FLAVIN, R. MCBRIDE y J.D.C. JONES, "Short optical path scan interferometric interrogation of fiber Bragg grating embedded in a composite", Electron. Lett., vol. 33, nº 4, 319-21, 1997.
- [8] J. KUSUMA, "Parametric Frequency Estimation: ESPRIT and MUSIC", Rice University, <http://cnx.rice.edu/content/m10588>, 2002.
- [9] César JÁUREGUI, Antonio QUINTELA, Adolfo COBO, M.A. QUINTELA, Silvia DÍAZ, José Miguel LÓPEZ-HIGUERA, "Interrogation of interferometric sensors with a tilted fiber Bragg grating", en Proceedings de Second European Workshop on Optical Fibre Sensors (EWOFS'04), 60-63, 2004.
- [10] Silvia DÍAZ, César JÁUREGUI, Manuel LÓPEZ-AMO y José Miguel LÓPEZ-HIGUERA, "Application of the Fast Fourier Transform and parametric frequency estimation for the measurement of the Bragg wavelength of interferometrically interrogated Fiber Bragg Grating sensors", en Proceedings de Second European Workshop on Optical Fibre Sensors (EWOFS'04), 492-495, 2004.
- [11] R.O. SCHMIDT, "A signal subspace approach to multiple emitter location and spectral estimation", Tesis doctoral, (Stanford University, Stanford, CA, 1981).
- [12] K.B. ROCHFORD y S.D. DYER, "Demultiplexing of interferometrically interrogated fiber Bragg grating sensors using Hilbert Transform processing", J. Lightwave Technol., vol. 17, nº 5, 831-836, 1999.
- [13] D.A. FLAVIN, R. MCBRIDE, J.D.C. JONES, J.G. BURNETT y A.H. GREENAWAY, "Combined temperature and strain measurement with a dispersive optical fiber Fourier-transform spectrometer", Opt. Lett., vol. 19, nº 24, 2167-2169, 1994.